

枪马金矿金品位统计分布特征及其地质意义

马文征¹, 黄建平², 郭 晓², 王铁军¹, 杨秀峰¹

(1. 中钢集团天津地质研究院, 天津 300181;

2. 灵宝黄金股份有限公司, 河南 灵宝 472500)

摘要: 地质变量的变化与地质体的特征密切相关, 通过地质变量的研究可以揭示地质体某一特征的规律性。多次地质事件的数理统计特征表现为多个总体叠加的混合分布, 因此通过研究混合分布和单一分布的特征, 对矿床的矿化成因、矿化过程和矿化特征认识有指导意义。研究发现, 枪马金矿的金品位主要由 2 个对数正态分布总体叠加而成, 并对应于本区 2 次主要的成矿事件。对金的特征参数垂直空间上的研究表明, 金矿化强度向深部逐渐增高, 深部找矿远景很大。

关键词: 金品位; 对数正态分布; 混合总体筛分; 特征参数; 枪马金矿; 河南省

中图分类号: P628.2; P618.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2012)04-0479-06

1 地质概况

枪马金矿位于豫、陕交界的河南省灵宝市境内, 隶属于我国三大原生金矿成矿区之一的小秦岭金矿带。矿区分布的基底岩系为太古界太华群, 下亚群主要为斜长角闪岩和片麻岩, 上亚群主要由斜长角闪岩类、片麻岩类、长英质岩类、大理岩、石英岩、和磁铁石英岩等岩石组成; 岩浆岩主要有花岗岩、辉绿岩脉、辉绿玢岩脉、闪长岩脉、伟晶状花岗岩脉、花岗岩脉及煌斑岩脉。矿区内断裂构造十分发育, 近 EW 向断裂是本区规模最大、活动最强、活动时间较长和多次复活的一组构造; 次为 NNW 向和 NNE 向两组剪切带构成的共轭断裂, 其中 NNW 向断裂最宽处可达 5 m; NE 向断裂不甚发育。矿区的主要金矿脉是 L706, L60, L209, L504, L507, L757, LN1, L903, L410 和 L421 等(图 1)。矿化类型主要为黄铁矿型金矿化, 其次为多金属硫化物矿化; 矿化形式主要有多金属硫化物单脉型、星散浸染型、黄铁矿化网脉—细脉浸染型、团块状面状黄铁矿型和裂隙充填型^[1]。地球化学元素组合为 Au-Ag-Cu-Pb-Zn-As-Sb-Bi。李惠等研究认为, 本区金矿成矿热液可

分为 4 期, 分别为黄铁矿—石英阶段、石英—黄铁矿阶段、石英多金属硫化物阶段、碳酸盐阶段^[2]。

2 金品位混合总体筛分

分布律具有的法则性质可视为数学模型, 与成矿相关的地质模型对地质规律的认识和潜力评价非常重要。由于地质作用的长期性、复杂性和多阶段性, 使得地质体观测值由多种地质成因或多次地质作用叠加而成; 数理统计特征表现为多个总体叠加的混合分布。如果混合总体成功分解为若干个理论子总体, 则说明蕴含着多种地质成因过程的信息, 具有若干个理论子总体的特征。因此通过研究单一分布和混合分布的特征, 对矿床的矿化成因、矿化过程和矿化特征认识有指导意义。

单一成因总体所构成的统计分布称为简单分布, 其概率密度函数曲线是单峰曲线, 在累计概率正态概率纸上是一条直线; 多个成因总体所构成的统计分布称为混合分布, 其概率密度分布曲线一般为双峰或多峰曲线, 在累计概率正态概率纸上是一条曲线。A. J. Sinclair^[3]研究发现, 混合分布总体累积概率和其包含的单一分布总体累积概率关系如下:

收稿日期: 2012-06-12; 改回日期: 2012-07-23; 责任编辑: 余和勇

作者简介: 马文征(1982-), 男, 工程师, 从事地质矿产勘查与研究。通信地址: 天津市河东区友爱东道平房 4 号, 中钢集团天津地质研究院; 邮政编码: 300181; E-mail: ma_wenzheng@163.com

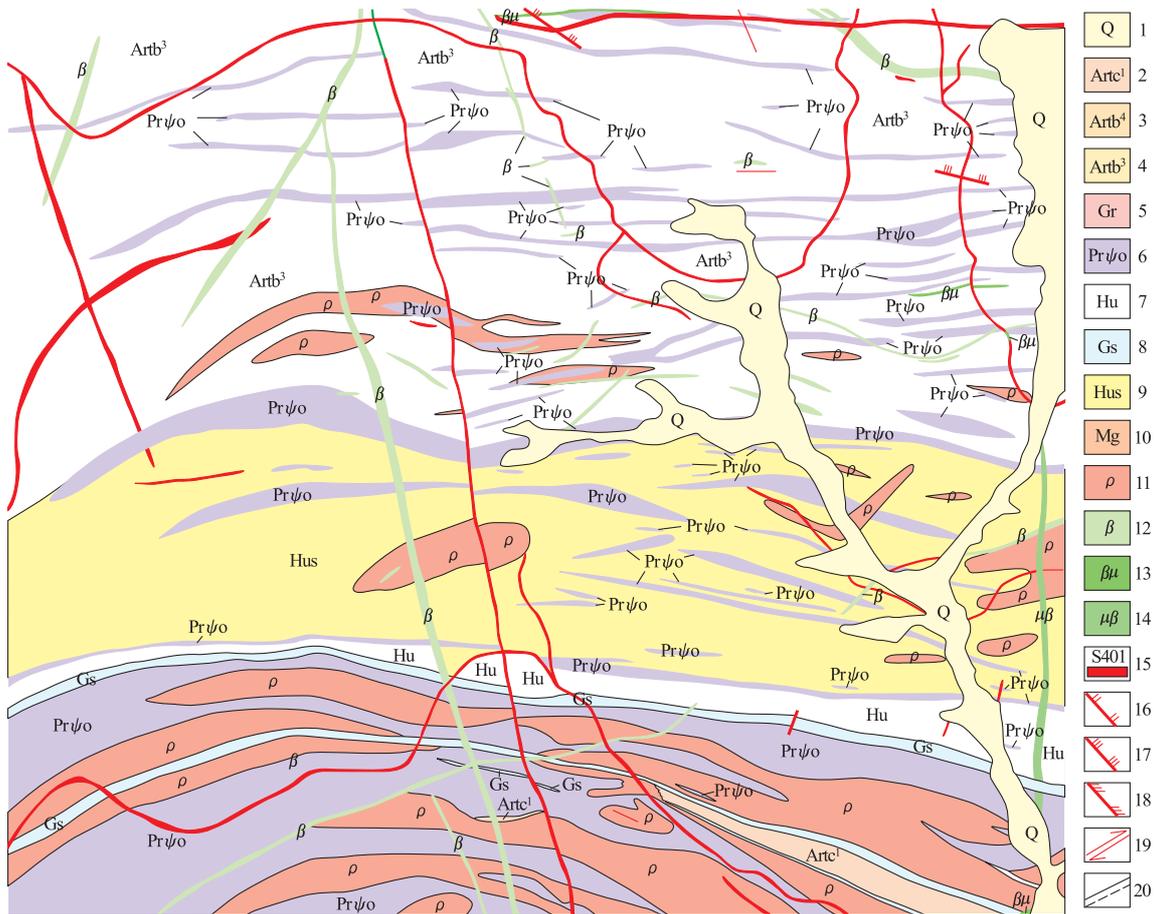


图1 枪马金矿地质简图

Fig.1 Geological sketch of Qiangma Au deposit

1. 第四系; 2. 条纹条带状混合岩、黑云斜长片麻岩夹含石墨黑云斜长片麻岩、大理岩、注入混合质斜长角闪岩,底部为石英岩; 3. 条纹条痕状混合岩、注入混合质斜长角闪岩; 4. 混合片麻岩、均质混合岩夹注入混合质斜长角闪岩; 5. 变粒岩; 6. 注入混合质斜长角闪岩; 7. 条纹条带状混合岩; 8. 石英岩; 9. 条纹条痕状混合岩; 10. 混合片麻岩; 11. 混合花岗岩伟晶岩; 12. 辉绿岩; 13. 辉绿玢岩; 14. 辉长辉绿岩; 15. 含金石英英及编号; 16. 压性断层; 17. 张性断层; 18. 压扭性断层; 19. 平推断层; 20. 实测/推测地质界线

$$P(A+B+C+\dots) = f_A P(A) + f_{(B+C+\dots)} P(B+C+\dots)$$

式中, P 为累积概率; f 为单一分布总体在混合分布总体中所占分数。

混合总体筛分的关键是确定累积概率曲线上的拐点,拐点是分布总体 A 和剩余分布总体在混合分布总体中所占比例的分界点;不言而喻,找到拐点就确定了分布总体 A 在混合分布总体中所占百分数。此外,当累积概率曲线从拐点处向左移动到一定的信息水平时,混合分布总体累积概率将主要由分布总体 A 的累积概率构成。剩余分布总体累积概率在该处表现为可以忽略不计的微小数值。因此,可以用混合分布总体在该信息水平上的累积概率估计分布总体 A 的累积概率,从而十分精确地把

分布总体 A 筛分出来。重复上述筛分过程,可以筛分出总体 B , 总体 C , 直到把全部总体筛分出来^[4-6]。

为研究枪马金矿金的统计分布特征,笔者收集了枪马金矿 1 463 m, 1 410 m, 1 385 m, 1 367 m, 1 329 m, 1 302 m, 1 269 m, 1 240 m, 1 208 m, 1 160 m, 1 145 m, 1 083 m, 1 050 m, 1 144 m, 1 057 m, 970 m 和 911 m 标高的沿脉间隔 25 m 取样的 665 个金的分析值数据。数据中金品位 $w(\text{Au}) = 0.002 \times 10^{-6} \sim 151 \times 10^{-6}$, 开采中的最高值有达 300×10^{-6} 者。许多地质变量服从或接近正态分布,但是经验表明,大多数内生有色一稀有金属矿床中的有用组分以及岩石、矿石中的微量元素都具有对数分布的特点。因此本次工作,首先对 665 个金分

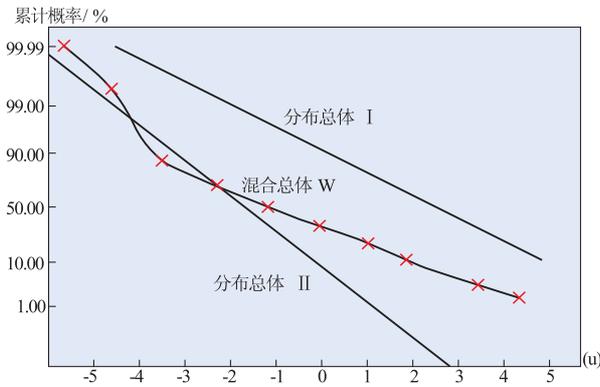


图 2 枪马金矿金品位混合筛分结果图
Fig. 2 Hybrid screening result of gold ore grade in Qiangma Au deposit

析数据进行自然对数变换,结果分布于-6.2146~5.0173之间,以1.12319为间隔分为10组;然后计算各组的组中数和频率,并在正态概率纸上作图。混合分布总体筛分过程如下:首先,确定I,II共2个总体各自所占的比例,模拟和计算得 $f_I = 19.86\%$, $f_{II} = 100\% - 19.86\% = 80.14\%$;然后,按照 $P_I = P_{(I+II)} / f_I$ 对混合总体曲线右侧部分(拐点以下)的数据(总体I,此时总体II的累积概率视为0)进行筛分;再按照 $P_{II} = (P_{(I+II)} - P_I * f_I) / f_{II}$,对混合曲线左侧部分(拐点以上)的数据(总体II)进行筛分;最后,得到正态分布总体I和正态分布总体II。将分布总体I、分布总体II和混合分布总体绘制到正态概率纸上(图2),观察可得,分布总体I、分布总体II理论直线紧密伴随混合分布总体实测值曲线,说明混合分布总体筛分的2个子分布总体是正确的。通过误差检验计算,筛分的结果是有效的(表1)。

分布总体 I 在混合分布总体中占 19.86%, 几何平均值为 8.8463×10^{-6} , 密度分布函数为:

$$P_I(u) = \frac{1}{1.4458\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{u-2.18}{1.4458}\right)^2} \quad (u = \ln x)$$

分布总体 II 在混合分布总体中占 80.14%, 几何平均值为 0.0781×10^{-6} , 密度分布函数为:

$$P_{II}(u) = \frac{1}{1.76788\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{u-2.55}{1.76788}\right)^2} \quad (u = \ln x)$$

通过对矿区金及其伴生元素地球化学特征^[2]、岩石矿物组合特征和金品位分布统计特征的研究,笔者发现:①金品位分布总体 II 对应于本区含金黄铁矿-石英阶段,矿石为乳白色石英脉和含细脉浸染状黄铁石英脉;分布总体 I 对应于本区含金石英-黄铁矿阶段和含金石英多金属硫化物阶段,矿石为烟灰色黄铁石英脉和含多金属硫化物石英脉;②分布总体 II 表征本区热液活动的范围,分布总体 I 表征本区最重要的金矿化阶段;③分布总体 II 和分布总体 I 叠加区域很容易形成工业金矿体。

3 金品位的特征参数

野外矿物观察和地球化学元素分析表明,矿化体各空间上的矿化强度并非均匀和一致,而是随着空间的变化,矿化强度也随之变化。金矿化强度在垂直空间上的变化规律和趋势是找矿预测的重要内容,金矿化强度可以用若干个金品位的特征参数来表示。因此通过探寻不同标高金品位的特征参数规

表 1 枪马金矿金品位混合总体筛分过程及结果

Table 1 Hybrid overall screening and the results of gold ore grade of Qiangma Au deposit

品位 $w(\text{Au})/10^{-6}$		频数	频率	混合总体 I 累计概率		混合总体 II 累计概率		混合总体累计概率		相对误差
分组区间	组中值			单一总体	混合总体	单一总体	混合总体	理论值	实测值	
≥ 49.1114	78.0000	11	0.0165	0.0861	0.0171	0.0000	0.0000	0.0171	0.0165	0.0363
15.9730~49.1114	31.2000	11	0.0165	0.1770	0.0352	0.0000	0.0000	0.0352	0.0331	0.0626
5.1951~15.9730	6.4125	47	0.0707	0.5150	0.1023	0.0019	0.0015	0.1038	0.1038	0.0000
1.6897~5.1951	2.8474	62	0.0932	0.6795	0.1349	0.0145	0.0116	0.1466	0.1970	-0.2560
0.5495~1.6897	0.9600	85	0.1278	0.8605	0.1709	0.0923	0.0740	0.2449	0.3248	-0.2461
0.1787~0.5495	0.3100	116	0.1744	0.9575	0.1902	0.3456	0.2770	0.4671	0.4992	-0.0643
0.0581~0.1787	0.1000	123	0.1850	0.9913	0.1969	0.7016	0.5623	0.7591	0.6842	0.1095
0.0189~0.0581	0.0300	117	0.1759	0.9985	0.1983	0.9460	0.7581	0.9564	0.8602	0.1118
0.0061~0.0189	0.0100	91	0.1368	0.9999	0.1986	0.9945	0.7970	0.9956	0.9970	-0.0014
< 0.0061	0.0035	2	0.0030	1.0000	0.1986	1.0000	0.8014	1.0000	1.0000	0.0000

表2 不同标高金品位特征参数检验结果

Table 2 Characteristic parameter of gold ore grade at different levels

特征参数	矿化空间标高/m		
	1376	1208	1057
n	226	204	235
p	0.1412	0.1522	0.3526
\bar{x}	15.6426	14.154	4.7115
σ	1.4071	1.3528	0.8888
$t(w(\text{Au}) > 1.5 \times 10^{-6})$	0.1858	0.1512	0.2809

律,以此寻求垂直空间上金矿化强度规律和趋势。其思路为:按照标高区间统计金分析数据值;将金品位按照上述混合总体筛分方法,求出各标高区间分布总体 I 占混合分布总体中相对百分率 P_1 ,将各标高区间中分布总体 I 的各特征参数求出,以分布总体 I 在分组区间的概率为权值计算概率分布模型的特征参数,以此来评价各标高区间的矿化强度^[7]。

运用数学方法对地质变量进行统计分析,通过地质信息定量分析和综合研究,建立模型的检验、优化和简化方法,以达到综合信息找矿模型的建立^[5]。将枪马金矿 1463~911 m 标高范围内按 25 m 间隔取样的金品位值归纳为:1 376 m,1 208 m 和 1 057 m 3 个区间。经过统计计算和分析,每个区间上的金品位仍然由 2 个对数正态分布总体混合而成。表 2 所列数据为基于垂向的分布总体 I 的各特征参数值。

由于分布总体 I 对应本区主要成矿阶段,因此分布总体 I 表征的矿化阶段出现,则指示该标高区间为金富集区域。根据可表征和量化原则,用分布总体 I 在混合分布总体中所占比例(p)、分布总体 I 中金的几何平均值(\bar{x}),金品位 $w(\text{Au}) > 1.5 \times 10^{-6}$ 所占混合总体的比例(t)和分布总体 I 中金品位标准差(σ)等 4 个特征参数研究垂向空间的矿化强度的变化规律。表 2 列出了 3 个标高区间上的金特征参数值。

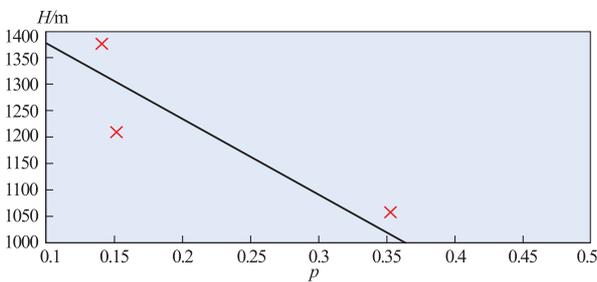


图3 特征参数 p 垂向分布图

Fig. 3 Vertical distribution of characteristic parameter p

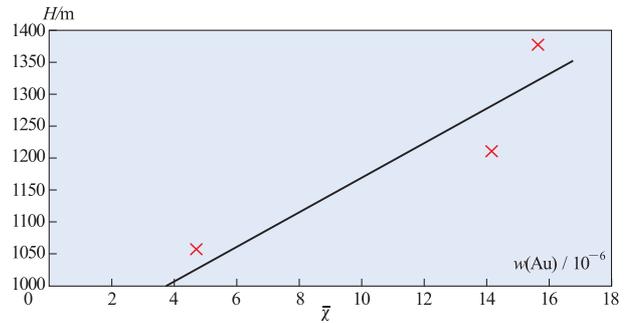


图4 特征参数 \bar{x} 垂向分布图

Fig. 4 Vertical distribution of characteristic parameter \bar{x}

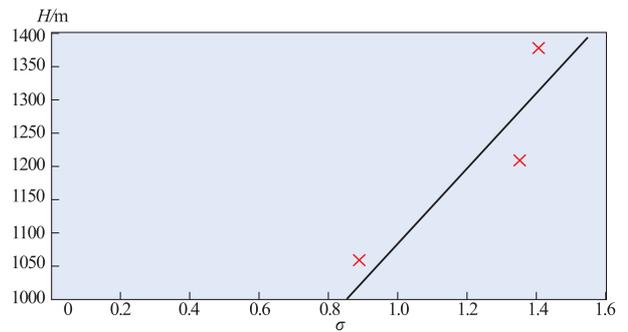


图5 特征参数 σ 垂向分布图

Fig. 5 Vertical distribution of parameter σ

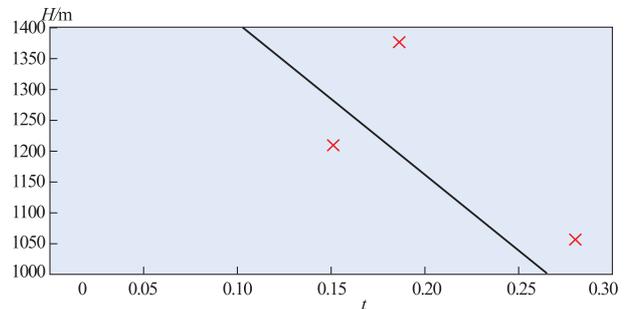


图6 特征参数 t 垂向分布图

Fig. 6 Vertical distribution of parameter t

由图 3 可知,分布总体 I 在混合分布总体所占百分数 p 在垂直空间上的分布近于一条直线。经

计算,分布总体 I 在混合分布总体所占百分数 p 与空间坐标 H 间的相关系数为 -0.874 ,表明 p 与坐标 H 之间呈线性相关。经回归分析得线性方程式:

$$p=0.8191-0.0007H$$

表明随着空间坐标值的降低,分布总体 I 在混合分布总体中所占比例以 0.0007 的速度递增。

分布总体 I 的金品位几何平均值与空间坐标 H 间的相关系数为 0.9100 ,表明与坐标 H 之间线性相关,为一条近似的直线(图 4)。经回归分析得线性方程式:

$$\bar{x}=29.2765+0.0338H$$

表明随着空间坐标值的降低,分布总体 I 的金品位几何平均值以 0.0338 的速度递减。

分布总体 I 金品位的标准差 σ 与空间坐标 H 间的相关系数为 0.8970 ,表明分布总体 I 金品位的标准差 σ 与坐标 H 之间线性相关,为一条近似的直线(图 5)。经回归分析得线性方程式:

$$\sigma=-1.7801+0.0016H$$

表明随着空间坐标值的降低,分布总体 I 金品位标准差 σ 以 0.0016 的速度递减。

分布总体 I 金品位几何平均值和总体 I 金品位标准差 σ 随空间坐标值降低而降低,说明金的富集在 1050 m 标高区间降低,但是总体 I 金品位标准差 σ 降低说明标高区段的金富集稳定。

金品位 $w(\text{Au})>1.5\times 10^{-6}$ 所占混合总体的比例 t 在垂直空间上的分布近于一条直线(图 6)。经过计算,金品位 $w(\text{Au})>1.5\times 10^{-6}$ 所占混合总体的比例 t 与空间坐标 H 间的相关系数为 -0.6860 ,表明 $w(\text{Au})>1.5\times 10^{-6}$ 金品位所占混合总体的比例 t 与坐标 H 之间呈线性相关。经回归分析得线性方程式:

$$t=0.3591-0.0003H$$

表明随着坐标值的减小, $w(\text{Au})>1.5\times 10^{-6}$

金品位所占混合总体的比例以 0.0003 的速度增高。

分布总体 I 在混合分布总体中所占比例 p ,分布总体 I 中金的几何平均值,金品位 $w(\text{Au})>1.5\times 10^{-6}$ 所占混合总体的比例 t 和分布总体 I 中金品位标准差 σ 等 4 个特征参数表征金矿化强度自上而下有逐渐增大的趋势,有利于探矿和开采。

4 结论

分布总体 I 对应的含金石英—黄铁矿阶段和含金石英多金属硫化物阶段是找矿和预测的指示标志;金矿化强度自上而下有逐渐增大的趋势。从定性的角度分析,枪马金矿区深部的成矿潜力很大;从定量和定位的角度分析,枪马金矿区深部的找矿地质研究工作很有必要。

致谢:在野外工作中,得到枪马金矿地测科人员的大力帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 中钢集团天津地质研究院. 河南省灵宝小秦岭金矿区找矿规律及深部成矿预测[R]. 天津:中钢集团天津地质研究院, 2007.
- [2] 李惠. 小秦岭金矿集中区深部第二富集带预测的构造叠加晕模型[J]. 物探与化探, 2008, 32(5): 525-528.
- [3] Sinclair A J. 根据率图在矿床勘探中的应用[M]. 赵鹏太, 译. 北京:地质出版社, 1981.
- [4] 赵鹏太. 矿床统计预测[M]. 北京:地质出版社, 1983: 34-43.
- [5] Peter A Rogerson. Statistical methods for geography[M]. London: SAGE Publications Ltd, 2001: 65-85.
- [6] 郭光裕. 峪耳崖金矿金品位统计分布特征及其地质意义[J]. 地质找矿论丛, 2000, 15(2): 142-150.
- [7] 王世称. 综合信息矿产预测理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2000: 16-34.

Statistical distribution of gold grade in Qiangma gold deposit and its geological significance

MA Wen-zheng¹, HUANG Jian-ping², GUO Xiao², WANG Tie-jun¹, YANG Xiu-feng¹

(1. *Sinosteel Tianjin Geological Academy, Tianjin 300181, China;*

2. *Lingbao Gold Co. Ltd, Lingbao 472500, Henan, China*)

Abstract: Variation of geological variables is closely related to characteristics of geological body. Statistics of the geological variables could reveal certain regularity of the geological body. Result of mathematical statistics of multiple geological events is manifested by several generally overprinted mixture distributions. Therefore, statistics of characteristics of the mixture distribution and single distribution is of guiding significance to understanding genesis, process and characteristics of mineralization. The statistical result shows that gold grade of Qiangma gold deposit is distributed in 2 overprinted logarithmic normal distribution overalls and the overalls are correspondent to two major geological events taken place in the area. Study on the vertical variation of the characteristic parameter shows that mineralization is intensified to depth and further exploration should be continued to depth of the gold deposit

Key Words: gold grade; logarithmic normal distribution; screen of mixture distribution overall; the characteristic parameter; Qiangma gold deposit; Henan province